昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*, November 2007, 50(11): 1099 - 1104　　ISSN 0454-6296

中华通草蛉复眼光感受性

闫海霞[1], 魏国树[1,4,*], 吴卫国[2], 闫海燕[1], 张海强[1], 李振波[3]

(1.河北农业大学,保定　071001;2.中国科学院生物物理研究所脑与认知科学研究中心,北京　100101;
3.保定广播电视大学,保定　071000;4.河北省农作物病虫害生防工程中心,保定　071001)

摘要:运用视网膜电位(Electroretinogram, ERG)技术,对中华通草蛉 *Chrysopa sinica* Tjedar 成虫复眼在暗适应过程中对单色光和白光刺激的光感受变化进行了测定。结果表明:(1)在 340 ~ 605 nm 光谱范围内该草蛉的光谱反应表现 3 个峰,其中最高峰位于 562 nm,次峰在 524 nm,第 3 峰在 460 nm;(2)一定光强度(LogI = 4.5 ~ 0)范围内,其复眼 ERG 值随光强度的增强而增大,呈近线性增长式样;(3)暗适应时间影响其复眼的 ERG 值大小,在暗适应 100 min 时其 ERG 值达到稳定;(4)中华通草蛉复眼 ERG 的波形由 4 个部分组成:开光反应、正相电位、持续负电位和闭光反应。

关键词:中华通草蛉;复眼;光感受性;视网膜电位;暗适应

中图分类号:Q967　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:0454-6296(2007)11-1099-06

Spectral sensitivity of the compound eye in the lacewing *Chrysopa sinica* Tjedar

YAN Hai-Xia[1], WEI Guo-Shu[1,4,*], WU Wei-Guo[2], YAN Hai-Yan[1], ZHANG Hai-Qiang[1], LI Zhen-Bo[3]

(1. Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China; 2. Center for Brain and Cognitive Sciences, Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Radio and TV University of Baoding, Baoding, Hebei 071000; 4. Research Center for Biocontrol Techniques Against Pests on Crops of Hebei Province, Baoding, Hebei 100101, China)

Abstract: Spectral responses of the compound eye in the lacewing, *Chrysopa sinica* during dark adaptation were investigated by using the ERG's methods. The results showed that monochromatic light stimuli across the spectrum ranging from 340 nm to 605 nm induced ERG's reaction of different amplitudes. There were three peaks in their spectral sensitivity curves. The major one appeared at 562 nm, the second 524 nm and the third 460 nm. In a certain intensity range of monochromatic and white light stimuli, the stronger the luminance, the higher the ERG's value of the lacewing. Length of the adapted-time could influence ERG's value, which reached balance at 100 min of dark-adapted time. There were four parts in the typical ERG of compound eyes of the lacewing, *i.e.*, a positive on-transient, potential of positive phase, a negative sustained potential and a negative off-transient, respectively; the size and shape of each part could be affected by wavelength, light-intensity and duration of the light stimuli.

Key words: *Chrysopa sinica*; compound eye; spectral sensitivity; electroretinogram; dark adaptation

中华通草蛉 *Chrysopa sinica* Tjedar 属脉翅目草蛉科,是我国南北方农、林、果等多种生态系统中捕食性天敌的优势种类。近年来,灯光诱杀广泛应用于害虫预测预报和综合治理中(丁岩钦等,1974;刘立春等,1997;魏国树等 1998);但是,灯光诱杀具有"不分敌我"的明显局限,在捕杀害虫的同时,也杀伤较多的天敌。在调查中发现,其所诱杀的天敌中草蛉类(中华通草蛉为主)占较大数量(魏国树等,1998)。灯光诱杀的非选择性缺陷尽管可以通过利用害、益虫种群发生时间和空间上的差异予以缓解,

基金项目:河北省自然基金项目(C004000341)

作者简介:闫海霞,女,1976 年 12 月生,硕士,主要从事有害生物综合治理方面的研究,E-mail: yhx289@sohu.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: weiguoshu03@yahoo.com.cn

收稿日期 Received: 2007-03-22; 接受日期 Accepted: 2007-09-25

但只有从了解天敌优势种——草蛉等的感、趋光行为的内在机制入手，明确草蛉复眼的光谱、光强度敏感性及其光感受的昼夜节律等才能从根本上加以解决。前人从复眼对光暗条件的适应变化、形态、微细结构及电生理等方面对棉铃虫做了大量研究工作（Callahamp，1965；Hasiso，1972；Eldumiati and Levengood，1972；Agee，1972，1973；丁岩钦等，1974；高尉曾和郭炳群，1983；高尉曾，1989；侯无危和贺小威，1979，1997；刘立春等，杨智勇等，1998a，b），但是，作为其天敌，中华通草蛉光感受性在国内外却研究较少（Duelli，1986；Karl and Stelz，1998；Yang *et al*.，1998）。本研究用电生理方法对中华通草蛉成虫的光感受性进行了研究，试图明确中华通草蛉和棉铃虫在光谱敏感性方面的差异，从而为研发新型诱杀光源和光活性物质提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试虫

1.1.1 试虫：中华通草蛉采于中国科学院生物物理研究所，在自然条件下保存于实验室内 1～2 天，饲喂以 10 %蔗糖液。

1.1.2 试材处理：挑选健壮、生理状态良好的中华通草蛉成虫，CO_2 轻微麻醉 0.5～1 min，令其昏迷，剪掉其附肢后用蜂蜡将其腹部朝下固定于一多维可调的球关节蜡台上，解剖镜下用特制微型手术刀于其右侧复眼背部近中央的角膜位置打一小孔，待插入记录电极。另在其中胸背部中央打一小孔，以插入铂金丝参考电极。为使其复眼适应状态尽量一致，每次实验前令其于室内日光灯下光适应 1 h 时，再置于暗室适应 2 h，然后进行光刺激。每组实验各重复 10 次。

1.2 实验装置及方法

实验于白天和晚上在暗室中进行，实验室温度保持于 21℃～23℃。

1.2.1 光源及光刺激：静止的白光和点单色光，均由 150 W 高压氙灯所得。光首先经石英隔热玻璃滤去红外，再由干涉滤光片获得单色光，单色光刺激的波长分别为 340，360，380，400，420，440，460，483，498，524，538，562，582 和 605 nm，继而通过一组调节光强度的中性滤光片或中性楔形滤光片，然后经过用石英透镜做的聚光镜将平行光会聚于内径为 3 mm 的石英光导入光端的焦平面上，得到刺激光。由计算机控制的电磁快门驱动器，用于适时触发快门及控制光刺激的时程。每次刺激时长为 100 ms，刺激间隔为 3 min。

1.2.2 光强度度量：光谱实验时，为消除不同干涉滤光片对单色光光强度衰减的差异，依热敏光电耦合照度计和检流计[street lighting photometer（EVANS Electroselenium LTD，HALSTEAD ESSEX ENGLAND）]读数，用中性滤光片、中性楔形滤光片调节不同波长单色光的光强度一致。光强实验时，用中性滤光片使白光光强按其对数值（LogI）渐次衰减，LogI 等级为 0，0.5，1，1.5，2，2.5，3，3.5，4，4.5。

1.2.3 记录：记录用玻璃微电极由上海脑所产硅化铝玻璃双层毛坯管（直径为 1.2 mm）在电极拉制仪上拉制而成，其尖端直径为 1 μm，灌注液为 2.5 mol/L 醋酸钾溶液。样品台放置于微电极推进仪上，调节推进仪使得记录电极插入复眼小孔内，下插至视网膜细胞层。光导出光端与复眼表面垂直，距离约 10 mm。电极插入复眼视网膜细胞时，测得电极的尖端阻抗为 80 MΩ。

采得的电位信号输入前置放大器后，一方面经隔离放大器输入计算机进行记录，另一方面直接输入示波器进行实时监视。

2 结果与分析

2.1 光谱敏感曲线

2.1.1 LogI = 1.0 时的光谱敏感曲线：暗适应 2 h 后，用中性滤光片和中性楔形滤光片调节 340～605 nm 波谱内的各单色光刺激的光强度相等，然后给予中华通草蛉成虫复眼光刺激，记录其各自的 ERG 值，其光谱敏感反应的变化动态见图 1（A）。由图 1（A）可以看出，上述波谱内的单色光刺激均能使该草蛉成虫复眼产生视网膜电位反应，依其 ERG 峰-峰值大小，其光谱反应为 3 峰型，其中主峰在黄绿光区的 562 nm，次峰为 524 nm，第 3 峰在蓝光区的 460 nm，且其主、次峰的 ERG 值相差甚小。

2.1.2 ERG ’s = 1.0 mV 时的光谱敏感曲线：暗适应 2 h 后，调节中性滤光片和楔形滤光片，使 340～605 nm 波谱内的各单色光刺激的中华通草蛉复眼的 ERG 值皆为 1.0 mV，然后对其刺激，记录各自的相对光强度值（LogI），光谱敏感反应见图 1（B）。由图 1（B）可以看出，上述波谱内的单色光刺激均能使该草蛉成虫复眼产生视网膜电位反应，其中主峰在在黄绿光区的 562 nm，次峰为 524 nm，第 3 峰在蓝光区的 460 nm，其主次峰的 LogI 值相差不大。

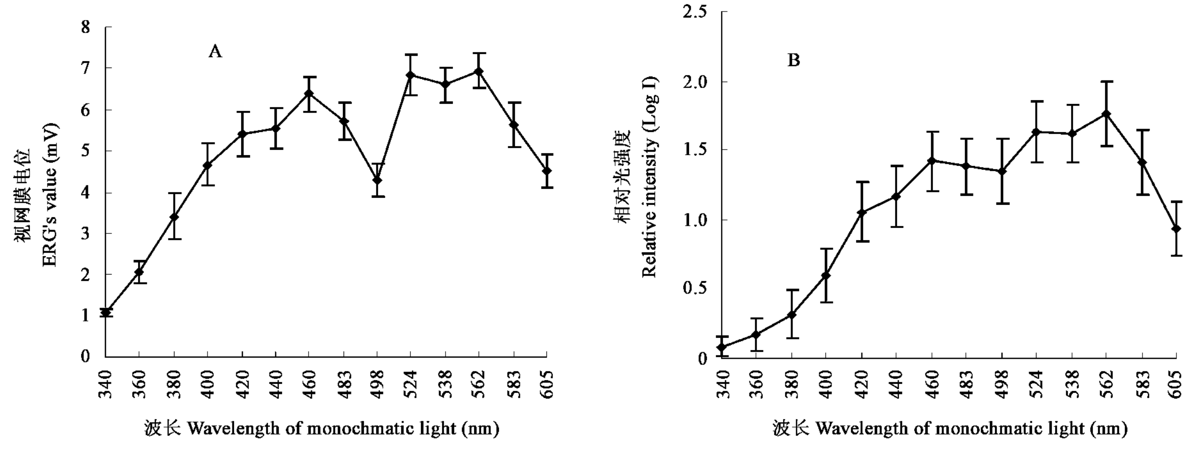

图 1　暗适应 2 h 后光谱敏感曲线

Fig. 1　Spectral sensitivity curves at the dark-adapted time of 2 h in the light

A：LogI = 1.0；B：ERG's = 1.0 mV.

以上两种研究方法的结果表明：在 340 ~ 605 nm 波谱内中华通草蛉成虫复眼对 562 nm、524 nm 和 460 nm 较敏感，表现为 3 峰反应型，鉴于其主、次峰的 ERG 值和 LogI 值相差不大，可能暗示其复眼具有蓝色和绿色两种光感受器类型。

2.2　光强度反应曲线

调节中性滤光片，选用不同光强度的点白光给予该草蛉成虫复眼刺激，其光强度敏感反应结果见图 2。由图 2 可以看出，在一定光强度范围（LogI = 4.5 ~ 0）内，随光强度的增强其 ERG 值变大，其光强度敏感反应曲线呈近线性式样，且在光强度逐渐增大时并未出现反应平台，表明该草蛉成虫的复眼具有更强的耐光能力或光强度自调节及适应能力。

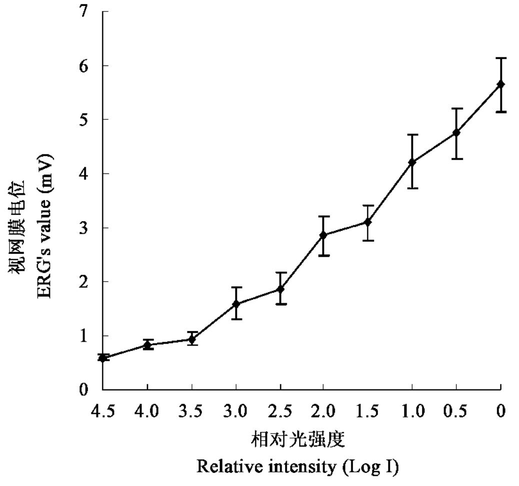

图 2　不同光强度白光刺激下 ERG 光强度反应曲线

Fig. 2　The curves of ERG response-intensity to white light of different intensity

2.3　暗适应时间与 ERG 反应的关系曲线

选用相对光强度为 Log I = 1.0 的白光刺激，测试了复眼暗适应时间对 ERG 值的影响大小，结果见图 3。由图 3 可以看出，随暗适应时间的增长其 ERG 值增大，40 min 内增速较快，后增速减缓，当暗适应达到约 100 min 时，其 ERG 值达到高端平台。结果表明，其复眼达到完全暗适应或其完成所涉及的形态和生理变化等过程大约需要 100 min，该时间的长短尚可能与细胞色素移动有关，这与 Karl 研究普通草蛉得到的结论相符合（Karl and Stelz，1998）。

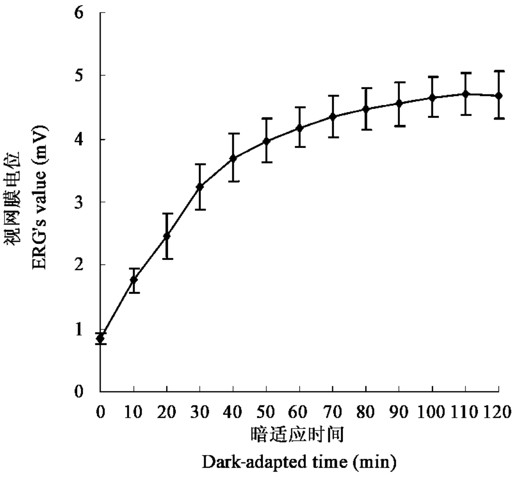

图 3　白光（Log I = 1.0）刺激下不同暗适应时间的 ERG 值变化

Fig. 3　ERG change during different dark-adapted time in white light（relative intensity LogI = 1.0）

2.4　影响 ERG 波形成分的因素

在中华通草蛉成虫暗适应 2 h 后，用不同刺激时程、不同波长的光刺激其复眼，得到其典型的

ERG 波形(图 4)。由图 4 可以看出,其 ERG 波形成分由 4 部分组成:最先出现的是与给光刺激同步的开光反应,随之是一个较小的正电位,继而是一段较长的持续负电位、最后是与光刺激终止同步发生的闭光反应。通过改变光刺激时程,波长和光强度,分析了影响中华通草蛉成虫复眼 ERG 波形成分的因子。图 5(A ~ F)显示了随刺激时程延长光强度相等时 524 nm 和 562 nm 单色光对中华通草蛉 ERG 波形成分的影响,在 ERG 各成分中,正相开光的电位大小随刺激时程的延长逐渐相对变弱;ERG 最主要的成分——持续负电位的大小随刺激时程的延长逐渐相对变强;而在闪光刺激短于 100 ms 时,几乎看不到闭光反应电位存在,只有当闪光刺激长于 100 ms 时才初露端倪并明显(200 ms)、变得尖削(600 ms)。

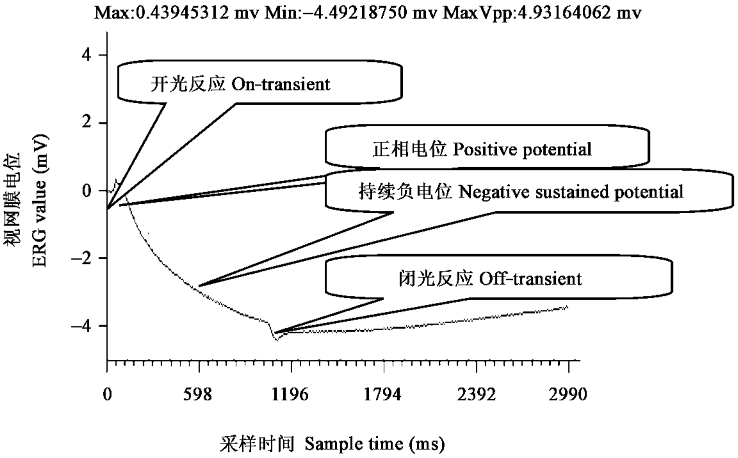

图 4 中华通草蛉复眼 ERG 波形图

Fig. 4 A typical ERG recording from the compound eye of *Chrysopa sinica*

3 讨论

在 340 ~ 605 nm 波谱内中华通草蛉成虫复眼对 562 nm、524 nm 和 460 nm 较敏感,表现为 3 峰反应型,由于其主、次峰的 ERG 值相差不大,可能暗示其复眼具有蓝色和绿色两种光感受器类型。棉铃虫对 483 nm 的蓝光,562 nm 的黄绿光及 400 nm 的紫外光较敏感,它与中华通草蛉波谱敏感曲线的峰值既有相同之处又有一定差异(杨智勇等,1998;魏国树等,1999,2002)。其第一峰位置(562 nm)与黄、绿叶植物可见光区的反射峰位置(560 nm)相当吻合,也与棉铃虫的敏感主峰位置相同,进一步证实白天中华通草蛉喜在绿色植物叶子上栖息、产卵(Duelli,1986),也暗示在长期适应演化过程中其寻找食物、配偶和栖息场所等生命活动是以其猎物寄主的表面绿色作为导引信息。棉铃虫对 400 nm 的紫外较敏感,但中华通草蛉成虫却对此波长的光不敏感;棉铃虫对 483 nm 的蓝光较敏感,而中华通草蛉成虫对此波长的单色光不敏感。棉铃虫和中华通草蛉的共有峰至少亦部分揭示出灯光诱杀害、益虫不分的原因。同时,初步明确了棉铃虫与其捕食性天敌优势种之一——中华通草蛉的光谱反应峰型的主要差异表现在蓝光区(483 nm)和近紫外部分(400 nm)。该结果为研发保护自然界天敌的、害虫测报和防治用的新一代选择性光源或光活性物质提供了科学依据,具有重要的实践指导意义。此外,其具有的 460 nm 感受器类型的生物学意义尚有待于进一步研究探讨。

在一定的光强度范围内(LogI = 4.5 ~ 0),中华通草蛉成虫复眼的 ERG 值随白光刺激光强度的增加而增大,呈近线性增长式样,不同于常见的 S 形曲线,而且亦未出现常见的 V-LogI 反应的高端平台(Wu *et al*.,1990)。分析其原因:一可能是由于光源本身的限制;二可能由于色素细胞内色素移动的调节,辅助了光敏感化学物质的分解过程,使其能在更宽的光照强度范围内保持分解的可能。由此可见,中华通草蛉复眼有较强的光耐受性和光强度自调节及适应机制,从而保证了其既能适应明亮的阳光,又能在较微弱的光环境下活动。

暗适应时间对中华通草蛉成虫复眼的 ERG 值有一定影响。随暗适应时间的延长其 ERG 值增大,在暗适应 100 min 时达到稳定状态。该过程可能是主要受昆虫复眼细胞色素纵向移动的影响,因为夜蛾、龟纹瓢虫复眼转化的组织解剖学研究发现:复眼内细胞色素的移动速度均随时间增加而减缓(闫

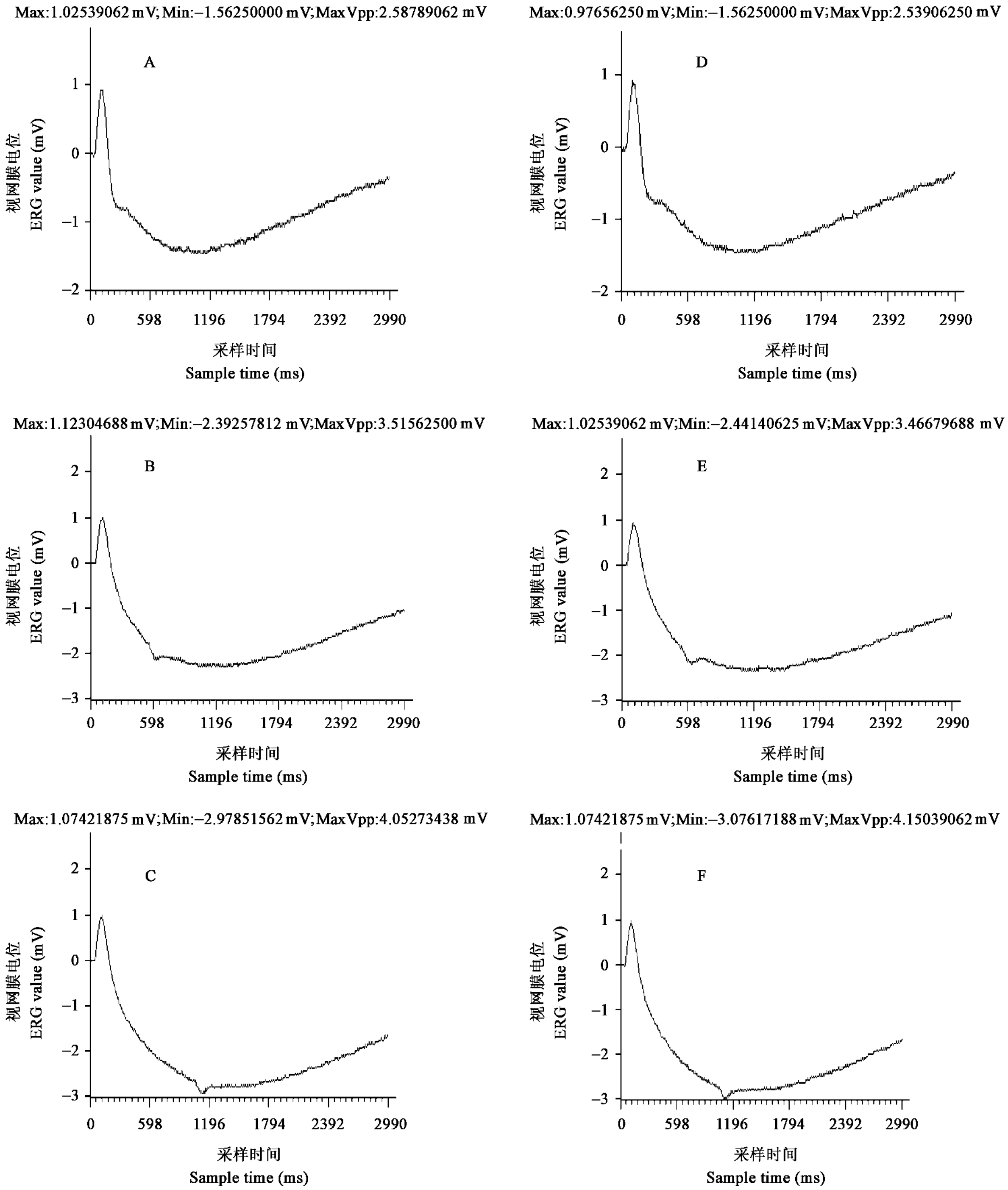

图 5　524 和 562 nm 单色光在 100,500 和 1 000 ms 刺激时的中华通草蛉复眼 ERG 波形

Fig. 5　ERG wave-shapes from compound eyes of *Chrysopa sinica* in
524 nm, 562 nm monchromatic light stimuli lasting 100, 500, and 1 000 ms.

A：Wavelength = 524 nm, Sample time = 100 ms；B：Wavelength = 524 nm, Sample time = 500 ms；
C：Wavelength = 524 nm, Sample time = 1 000 ms；
D：Wavelength = 562 nm, Sample time = 100 ms；E：Wavelength = 562 nm,
Sample time = 500 ms；F：Wavelength = 562 nm, Sample time = 1 000 ms.

海燕等,2006)。

光刺激下,中华通草蛉成虫复眼的 ERG 波形成分包括 4 个组成部分：首先是正相的‘开光反应’电位,随之为一小的正相电位,继而是一大而持久的负相偏转,即持续负电位,最后为一负相的‘闭光反应”电位。多数研究者认为,昆虫复眼 ERG 的开光反应

和闭光反应起源于复眼视叶，而持续复电位则由网膜细胞层的视网膜细胞产生（陈德茂和马午，1980），基于该 ERG 波形成分组成及其相对大小，ERG 峰的峰值可以视作视网膜电位的等同值。

参 考 文 献 (References)

Agee HG，1972. Sensory response of the compound eye of adults *Heliothis zea* and *H. virescens* to ultroviolet stimuli. *Ann. Entomol. Soc. Am.*，65(3)：701－705.

Agee HG，1973. Spectral sensitivity of the compound eyes of field-collected adult bollworms and tobacco budworms. *Ann. Entomol Soc. Am.*，66(3)：613－615.

Callaham PS，1965. Intermediate and far infrared sensing of nocturnal insects. *Ann. Ent. Soc. Am.*，58(5)：746－756.

Chen DM，Ma W，1980. Spike potentials recorded from retinular cells of the compound eye of the armyworm moth. *Acta Physiol. Sin.*，32(4)：381－384. [陈德茂，马午，1980. 粘虫蛾复眼视网膜的峰电位发放. 生理学报，32(4)：381－384]

Ding YQ，Gao WC，Li DM，1974. Study on the phototactic behavior of nocturnal moth：the response of *Heliothis armiger* (Hübner) and *Heliothis assulta* Guenée to different monochromatic light. *Acta Entomol. Sin.*，17(3)：307－317. [丁岩钦，高尉曾，李典谟，1974. 夜蛾趋光特性的研究：棉铃虫和烟青虫成虫对单色光的反应. 昆虫学报，17(3)：307－317]

Duelli P，1986. Flight activity pattern in lacewings (Planipennia：Chrysopidae). In：Gepp J，Aspock H eds. Proceedings of the 2nd International Symposium on Neuropterology. Hamburg，Graz. 165－170.

Eldumiati II，Levengood WC，1972. Summary of attractive responses in *Lepidoptera* to electromagnetic radiation and other stimuli. *J. Econ. Entomol.*，65(1)：291－292.

Gao WC，Guo BQ，1983. The external morphology and fine structure of the compound eye of cotton bollworm moth，*Heliothis armigera* (Hübner). *Acta Entomol. Sin.*，26(4)：375－378. [高尉曾，郭炳群，1983. 棉铃虫蛾复眼的形态及显微结构. 昆虫学报，26(4)：375－378]

Gao WC，1989. The relationship between transitional speed and the time of light adapation of noctuid compound eyes. *Acta Entomol. Sin.*，32(3)：306－309. [高尉曾，1989. 夜蛾转化速度与暗适应的时间关系. 昆虫学报，32(3)：306－309]

Hasiso HS，1972. The attraction of moth (*Trichoplusia ni*) to infrared radiation. *J. Insect Physiol.*，18(9)：1 705－1 714.

Hou WW，Li MH，Guo BQ，1997. An observation of response of *Helicoverpa armigera* (Hübner) to different levels of illumination. *Entomological Knowledge*，34(1)：1－3. [侯无危，李明辉，郭炳群，不同照度对棉铃虫蛾活动的影响. 昆虫知识，34(1)：1－3]

Hou WW，He XW，1979. Studies on the phototactic behavior of nocturnal moths；change in behavior during the transformation of compound eyes. *Acta Entomol. Sin.*，22 (1)：34－39. [侯无危，贺小威，1979. 夜蛾趋光特性的研究：复眼转化过程中的行为变异. 昆虫学报，22 (1)：34－39]

Karl K，Stelzl M，1998. Daily visual sensitivity pattern in the green lacewing *Chrysoper carnea* (Neuroptera：Chrysopidae). *Eur. J. Entomol.*，95：327－333.

Liu LC，Gu GH，Chen JJ，Chen XB，1996. A preliminary study on the behaviour of four moth species under lamplight. *Entomological Knowledge*，34(2)：96－99. [刘立春，顾国华，陈建军，陈小波，1996. 四种蛾类等下行为特点初步研究. 昆虫知识，34(2)：96－99]

Wei GS，Zhang QW，Zhou MZ，Wu WG，2002. Characteristic response of the compound eyes of *Helicoverpa armigera*. *Acta Entomol. Sin.*，45(3)：323－328. [魏国树，张青文，周明牂，吴卫国，2002. 棉铃虫蛾复眼光反应特性. 昆虫学报，45(3)：323－328]

Wei GS，Zhang QW，Cai QN，1998. Assessment on the control effect of compound trap measures on *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Acta Entomol. Sin.*，41(Suppl.)：132－139. [魏国树，张青文，蔡青年，1998. 重点单相诱杀复合配置对棉铃虫的诱杀效果及规格比较，昆虫学报，41(增刊)：132－139]

Wei GS，Zhang QW，Zhou MZ，Wu WG，1999. Studies on the electroretinogram of the compound eyes of *Helicoverpa armigera* (Hübner) moth.. *Acta Biophysica Sinica*，15(4)：681－688. [魏国树，张青文，周明牂，吴卫国，1999. 棉铃虫复眼视网膜电位研究. 生物物理学报，15(4)：681－688]

Wu WG，Wu MY，Warrant EJ，1990. Physiological changes of photoreceptor of Bush Cricket compound eye as a function of time and adaptation state. *Chinese Science Bulletin*，35(15)：1319－1320.

Yan HY，Wei GS，Yan HX，2006. The morphology and fine structure of the compound eye of *Propylea japonica*. *Entomological Knowledge*，43(3)：343－348. [闫海燕，魏国树，闫海霞，冯利，2006. 龟纹瓢虫成虫的复眼形态及其显微结构. 昆虫知识，43(3)：343－348]

Yang ZY，Wu WG，Feng HP，Wu W，Zhang QW，1998a. The spectral sensitivity and hyperpolarizing afterpotencial of the retinula cells in adult *Helicoverpa armigera*. *Acta Biophysica Sinica.*，14(1)：85－90. [杨智勇，吴卫国，冯汉平，吴炜，张青文，1998. 棉铃虫成虫复眼的光谱敏感性及超极化后电位的研究. 生物物理学报. 14(1)：85－90.]

Yang ZY，Wu WG，Feng HP，Wu W，Zhang QW，1998b. The comparison of response characteristics to light stimulation between the compound eyes of cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*) and corn borer (*Ostrinia furnacalis*). *Acta Biophysica Sinica*，14(4)：713－718. [杨智勇，吴卫国，冯汉平，吴炜，张青文，1998. 棉铃虫和玉米螟成虫复眼光反应特性的比较研究. 生物物理学报，14(4)：713－718]

Yang IF，Lin JT，Wu CY，1998. Fine structure of the compoundeye of *Malladabasa liseuroptera*：Chrysopidae. *Ann. Entomol. Soc. Am.*，91(1)：113－121.

(责任编辑：袁德成)